

# Exobolygó-rendszerek dinamikai vizsgálata (PD48424 / D048424)

## ZÁRÓJELENTÉS

A Naprendszeren kívüli, azaz extraszoláris- vagy exobolygók kutatása a modern csillagászat egyik legdinamikusabban fejlődő területe. Az első exobolygó felfedezése óta már közel háromszáz bolygót ismerünk, és ez a szám a meglévő mérési módszerek finomodása, valamint új módszerek kifejlesztése nyomán rohamosan növekszik. Az eddig felfedezett exobolygók túlnyomó része igen nagytömegű, azaz Jupiter-típusú gázóriás. A Föld-típusú bolygók megfigyelése a jelenlegi földfelszínen található műszerekkel nem lehetséges még, ezért az első Föld-típusú exobolygó megfigyelése különösen nagy kihívást jelent az észlelő csillagászat számára.

A Föld-típusú bolygók felfedezésének óriási tudományos jelentősége lenne: egyrészt igazolást nyernének a bolygórendszerek kialakulását leíró elméletek, másrészt alkalmunk nyílna annak megvizsgálására, hogy megvannak-e más bolygókon a feltételek egy földi-típusú élet kialakulására. Nem véletlen, hogy nagyszabású projektek kezdődtek a Föld-típusú exobolygók észlelésére. A kívánt megfigyelési pontosság a földfelszínről nem érhető el, ezért a tervezett programok, illetve a már működő program mindegyike űreszközökhöz kapcsolódik. A CoRoT űrtávcső (CNES, ESA és mások), melyet tavaly állították Föld körüli pályára, már képes lenne a Szuper-Földek, azaz a néhány Föld-tömegű bolygók észlelésére. A közeljövőben pályára állítandó Kepler űrtávcső már a Földnél kisebb tömegű és átmérőjű bolygók észlelésére is képes lenne. A távolabbi jövő még tervezési fázisban lévő eszközei (GAIA - ESA; TPF - NASA) már a felfedezett Föld-típusú exobolygó légkörének spektroszkópiai analiziséből annak összetételét is meg tudnák határozni. A biomarker gázok jelenlétéből pedig egy esetleges földi élet létrehozatalára lehetne következtetni.

Munkám során az exobolygó-kutatás különböző aspektusaival foglalkoztam; ezek magukba foglalják a Föld-típusú bolygók stabilitásának és kialakulásának, továbbá a bolygórendszerek, és ezen belül a rezonáns rendszerek létrejöttének kérdéseit. Kutatásaim alatt folytattam a már meglévő együttműködésemet a Bécsi Tudományegyetem Asztrodinamikai kutatócsoportjának munkatársaival. Új és eddig igen eredményesnek bizonyuló együttműködést építettem ki a Tübingeni Egyetem Csillagászati és Asztrofizikai Intézetének Dr. Wilhelm Kley professzor által vezetett kutatócsoportjával, továbbá a Córdoba-i Egyetem Csillagászati Observatóriumának (Argentína) egyik vezető munkatársával Dr. Cristian Beaugé-val.

Az elért eredményekből kilenc referált publikáció, valamint egy könyvfejezet született. A továbbiakban részletesen ismertetem az elért eredményeket a megjelent közlemények tükrében.

## Hipotetikus Föld-típusú exobolygók stabilitási kérdéseinek vizsgálata

Mivel Föld-típusú exobolygót eddig még nem sikerült észlelni, ezért a kutatások részben ezen égitestek általános dinamikai jellemzőinek vizsgálatára irányulnak. A vizsgálatokban jelentős szerepük van a modern égi mechanika elméleti és numerikus módszereinek. Egy felfedezésre váró Föld-típusú exobolygó esetében az egyik legfontosabb kérdés az, hogy a csillagtól milyen távol kering - ez meghatározza, hogy létezhet-e a felszínén folyékony halmazállapotú víz, azaz a csillag lakhatósági tartományában kering-e -, illetve pályája dinamikailag elegendően stabil-e ahhoz, hogy rajta az élet kialakulhasson és fennmaradhasson.

### Föld-típusú exobolygók stabilitási katalógusa

Sándor, Zs., Süli, Á., Érdi, B. et al.: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **375**, 1495-1502, 2007;

<http://astro.elte.hu/exocatalogue>

A Jupiter-típusú gázóriások észlelése jelenleg többnyire spektroszkópiai módszerrel történik. Az észlelés során meghatározzák a csillag radiális sebességgörbáját, és ebből következtetnek a kísérő égitest tömegére és pályaelemeire (ezek a fél-nagy tengely, excentricitás, periasztron argumentuma és peri-

asztron-áthaladásának ideje). Általánosságban megállapítható, hogy minél több mérési pontra történik a radiális sebességgörbe illesztése, annál pontosabb pályaelemeket kapunk. Ezért főleg a nagyobb keringési idejű óriásbolygók pályaelemei sok esetben eléggé bizonytalanok, és igen gyakran változnak a különböző adatbázisokban (pl. <http://exoplanets.org>, <http://exoplanet.eu>, stb). Ha egy konkrét rendszerben vizsgáljuk, hogy létezhetnek-e Föld-típusú exobolygók a csillag körül (és leginkább annak lakhatósági tartományában), az óriásbolygó pályaelemeinek bármely változása esetén a Föld-típusú bolygó stabilitását újra meg kell határozni. Ezért fogalmazódott meg az a ötlet, hogy egyedi rendszerek vizsgálata helyett hozzunk létre egy globális stabilitási katalógust.

Mivel a az eddig megismert exobolygó-rendszer mintegy 90 %-ánál egy óriásbolygót ismerünk, a stabilitási katalógust az elliptikus korlátozott háromtest-probléma modelljében hoztuk létre. A stabilitási katalógus három paramétertől függ. Ezek a csillag-óriásbolygó rendszer tömegparamétere ( $\mu$ ), az óriásbolygó excentricitása ( $e_1$ ), valamint a Föld-típusú bolygó fél-nagy tengelye ( $a$ ). A tömegparamétert igen széles tartományban változtattuk, és minden értékre feltérképeztük a Föld-típusú bolygó fél-nagy tengelye és az óriásbolygó excentricitása által kifeszített paraméter-síkot. Így minden tömegparaméterre meghatároztunk egy stabilitási térképet, melyek összessége adja a stabilitási katalógust. Egy stabilitási térkép esetén 80 ezer összetartozó ( $a-e_1$ ) párt használtunk, mint kezdeti feltételt a mozgásegyenletek numerikus integrálásához. Az integrálás során az adott kezdeti feltételekből származó pálya relatív Ljapunov indikátorát számoltuk ki (RLI, Sándor és társai 2004), melyből a annak stabilitására következtettünk.

A katalógus használata igen egyszerű: ha meg szeretnénk vizsgálni, hogy egy konkrét, egy óriásbolygót tartalmazó rendszerben hol keringhet stabil pályán Föld-típusú exobolygó, akkor ki kell számolni a rendszerre jellemző tömegparamétert és az ahhoz tartozó stabilitási térképen erre a kérdésre azonnal válasz adható. A rendszer lakhatósági tartományát felrajzolva a stabilitási térképre az is azonnal eldönthető, hogy keringhet-e a csillag körül lakható Föld-típusú bolygó. (A katalógus létrehozásakor 15 ismert rendszer lakhatósági tartományait is megvizsgáltuk.)

A stabilitási térképek segítségével megállapítható még, hogy egy adott rendszerben felfedezendő Föld-típusú bolygónak a megfigyelési adatokból meghatározott pályaparaméterei dinamikailag konzisztensek-e?

A katalógus létrehozása során megállapítottuk, hogy a stabilitás elsődleges feltétele az, hogy a lakhatósági tartományt mennyire hálózzák be a különböző középmozgás rezonanciák. A rezonanciák stabilizálhatják az égitestek - így a Föld-típusú bolygó mozgását -, ugyanakkor az instabilitás fő okozói is lehetnek. Ha az adott rendszerben található még fel nem fedezett óriásbolygó, akkor annak gravitációs hatása az esetleges szekuláris rezonanciákon keresztül instabillá teheti a középmozgás rezonanciát és annak közvetlen környezetét. A fentiek tükrében megállapítható, hogy a Föld-típusú bolygó akkor a legstabilabb, ha a fázistér „rezonanciákban szegény” tartományában van. A rezonanciák számának növekedése, azok átfedése, illetve egyéb esetleges szekuláris hatások eredményeképpen végsősoron az adott tartomány instabillá válását okozhatja.

## **Föld-típusú exobolygó pályadatainak becslése bolygóátvonulás észleléséből**

Sándor, Zs.: *Celest. Mech. Dyn. Astron.* **95**, 273-285, 2006

A Föld-típusú exobolygók felfedezésére tervezett űreszközök az átvonulási fotometria módszerét alkalmazzák. A bolygó, amint a csillag korongja előtt áthalad, annak fényességében kis csökkenést okoz. A fényességcsökkenések periódusából megállapítható a bolygó pályájának fél nagy tengelye. Ha ismert a csillagkorong átmérője, és a bolygóátvonulás időtartama is mérhető, egy olyan egyenlet vezethető le, mely kapcsolatot teremt a csillag és bolygó tömege, az átvonulás időtartama, a fél-nagy tengely, az excentricitás, a periasztron argumentuma, valamint a pályahajlás között. A pályahajlás rögzített értékei mellett, ismerve a csillag tömegét az egyenletben két ismeretlen szerepel, az excentricitás ( $e$ ) és a periasztron argumentuma ( $\omega$ ).

Ha a csillag körül egy vagy több már ismert óriásbolygó is kering, akkor az ( $\omega-e$ ) paraméter-síkon kaotikus (azaz hosszú időtartam alatt instabilitást eredményező) tartományok is megjelennek. Ezen tar-

tományok segítségével, a különböző pályahajlás értékek mellett felső korlát adható az átvonulás során észlelt Föld-típusú bolygó excentricitására.

### Koorbitális Föld-típusú exobolygók stabilitási vizsgálata

Koorbitális mozgásról beszélünk, ha két égitest közel-azonos pályán kering egy nagytömegű égitest körül. Számos naprendszerbeli példa közül a legismertebbek a Trójai kisbolygók, melyek a Jupiter koorbitális kísérői. Várható, hogy az exobolygó-rendszerekben is találunk majd példákat koorbitális mozgásra. Kutatásaink során azt vizsgáltuk, hogy létezhet-e stabil pályán egy a lakhatósági tartományban keringő óriás exobolygónak Föld-típusú koorbitális kísérője?

A témakörben három közlemény született, ezeket a vizsgálatok jellegéből adódó sorrendben fogom ismertetni.

### Numerikus vizsgálatok

(i) Érdi, B., Sándor, Zs.: *Celest. Mech. Dyn. Astron.* **92**, 113-121, 2005

A fenti tanulmányban elsőként vizsgáltuk annak a lehetőségét, hogy létezhetnek-e adott rendszerekben stabil pályán Föld-típusú exobolygók a csillag lakhatósági tartományában? Vizsgálataink kilenc olyan exobolygó-rendszerre terjedtek ki, melyekben az óriásbolygó teljes egészében, vagy részben a csillag körüli lakhatósági tartományban kering. Öt rendszer esetében az ismert óriásbolygó teljes egészében a csillag lakhatósági tartományában kering, míg a fennmaradó rendszerek esetében ugyan az óriásbolygó fél-nagy tengelye a lakhatósági tartomány határai közé esik, de a nagy excentricitás miatt a bolygó elhagyja a lakhatósági tartományt.

A vizsgált rendszerekben meghatároztuk a stabil Lagrange-pontok (L4, L5) körüli stabilitási tartomány méretét és struktúráját az elliptikus korlátozott háromtest-probléma modelljében. A numerikus szimulációk során, melyeket a Relatív Ljapunov indikátorok segítségével végeztünk el, megállapítottuk, hogy a vizsgált rendszerek mindegyikében a stabil Lagrange-pontok körül egy kiterjedt stabilitási tartomány található, melyben keringhet Föld-típusú bolygó stabil pályán.

A stabilitási tartomány mérete a csillag és óriásbolygó tömegéből számítható tömegparamétertől ( $\mu$ ), valamint az óriásbolygó excentricitásától ( $e$ ) függ. Vizsgálataink során feltérképeztük a tömegparaméter - excentricitás sík dinamikai struktúráját. Ennek érdekében az összetartozó ( $\mu - e$ ) értékekre meghatároztuk a stabilitási tartomány méretét. A kapott dinamikai térkép igen érdekes struktúrát mutat; bizonyos helyeken a stabilitási tartomány mérete hirtelen lecsökken, majd újra megnövekedik. Azt a sejtést fogalmaztuk meg, hogy ez a viselkedés az L4 (vagy L5) pont körüli mozgás hosszú és rövid periódusú komponensei között fennálló rezonanciákkal van összefüggésben. Ezt a sejtést igazoltuk a következő munkánk során.

(ii) Érdi, B., Nagy, I., Sándor, Zs. et al.: *Mon. Not. R. Aston. Soc.* **381**, 33-40, 2007

Kutatásainkat kiterjesztettük az általános háromtest-probléma modelljére is. Numerikus vizsgálataink szerint többszáz Föld-tömegű vagy akár egy Jupiter-tömegű Trójai bolygó is létezhet a stabil Lagrange-pontok környezetében. A stabil Lagrange-megoldásból kiindulva igen részletesen feltérképeztük a tömegparaméter – excentricitás síkot.

Bizonyosságot nyertünk, hogy a stabilitási tartomány méretének eloszlása végső soron az L4 pont körüli mozgás hosszú és rövid periódusú komponenseinek rezonanciáitól függ. A rövid és hosszú periódusú komponenseknek megfelelő frekvenciákat egy a frekvenciákban 20-ad fokú, az tömegparaméterben 5-öd fokú és a excentricitásban 4-ed fokú algebrai egyenlet numerikus megoldása nyomán sikerült meghatároznunk. A különböző rezonanciákat a tömegparaméter – excentricitás síkon ábrázolva megdöbentően jó egyezést kaptunk a stabilitási tartomány minimumhelyei és a rezonanciák helyzete között.

## Analitikus vizsgálatok

Efthymiopoulos, C., Sándor, Zs.: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **364**, 253-271, 2005

A stabil Lagrange megoldások körüli stabilitási tartomány analitikus eszközökkel történő meghatározása a modern égi mechanika egyik legnehezebb problémája. A kérdés elvi fontosságú mind a naprendszerbeli Trójai kisbolygók stabilitásának, mind az exobolygó-rendszerekben létrejövő koorbitális mozgások vizsgálatakor.

Egy közel-integrálható Hamiltoni rendszer esetében (amennyiben a Hamilton függvény teljesíti a megfelelő simasági feltételeket) a Nyekhorosev-tétel segítségével megfogalmazható a praktikus stabilitás fogalma. Ha a perturbációs erősségét megadó paraméter elegendően kicsi,  $\varepsilon \ll 1$ , akkor a hatások terében a trajektóriák vándorlása exponenciálisan lassú:  $|J(0) - J(t)| < O(\varepsilon^a)$ , minden  $t < T$ -re, ahol  $T \sim O(e^{1/\varepsilon})$ . A tétel felhasználható úgy is, hogy megadjuk a  $T$  időkorlátot, és megkeressük azt a maximális fázistér tartományt, melyet a trajektóriák bejárhatnak. Égi mechanikai problémák esetében ez az időkorlát a Naprendszer életkora,  $T=10^{10}$  év. A Nyekhorosev-tételt alkalmazva, formális integrálok segítségével sikerült az eddigi legjobb becslést adnunk a korlátozott háromtest-probléma stabil Lagrange megoldásai körüli tartomány kiterjedésére. Kimutattuk, hogy a jelenleg katalógizált Trójai kisbolygók 48 %-a ebbe a tartományba esik (eredményeink előtt a legjobb becslés csak néhány kisbolygó számára biztosította a stabilitást).

Eredményeinket az általunk a Trójai mozgás számára kifejlesztett szimplektikus leképezések segítségével értük el (Sándor és társai, 2002). A becsléshez használt formális integrálok levezetéséhez a leképezés generátorfüggvényét 80-ad rendig fejtettük Taylor sorba a *Mathematica* program segítségével.

## Exobolygó-rendszerek kialakulása és korai fejlődése

Az exobolygó-rendszerek kialakulásának vizsgálata új témaként került be a posztdoktori kutatásaim közé, melyek eredetileg csak a Föld-típusú exobolygók dinamikai stabilitásának vizsgálatát foglalták magukba. Elsőként a koorbitális Föld-típusú bolygók kialakulásának kérdése merült fel, majd az akkréciós korongokkal kapcsolatos ismeretek megfigyelési és elméleti úton történő bővülése hatására kezdtem el foglalkozni a planetáris migráció és ezen belül az egymással középmozgás rezonanciában álló bolygók-ból álló rendszerek kialakulásának és korai fejlődésének kérdéskörével.

## Koorbitális Föld-típusú bolygók kialakulása

Beaugé, C., Sándor, Zs., Érdi, B., Süli, Á.: *Astron. Astrophys.* **463**, 359-367, 2007

A jelenlegi bolygó-keletkezési elméletek szerint a Föld-típusú, azaz a szilárd kéreggel rendelkező bolygók a protoplanetáris korong poranyagából kialakult planetezimálok ütközéses akkréciója során keletkeztek. Kutatásaink során azt vizsgáltuk, hogy kialakulhat-e olyan Föld-típusú bolygó, mely egy már meglévő óriásbolygó koorbitális kísérője? Ehhez az szükséges, hogy a csillag-óriásbolygó rendszer stabil Lagrange pontjai (L4, L5) körüli stabilitási tartományba befogódjon egy planetezimál-sokaság. Erre a naprendszerbeli Trójai kisbolygók népes családja szolgáltat bizonyítékot.

Az általunk kifejlesztett numerikus kód segítségével vizsgáltuk egy Trójai-típusú planetezimál-sokaság fejlődését. A kóddal nyomon követhető a planetezimálok ütközéses akkréciója, a két planetezimál ütközésekor keletkezett új égitest kezdeti hely- és sebesség-koordinátáit a teljesen rugalmatlan ütközés során megmaradó impulzusból számítottuk ki. Az óriásbolygó tömegétől függően a planetezimálok ütközésekor a gravitációs kölcsönhatás mellett még gáz fékezőerő is felléphet. Ha az óriásbolygó tömege a Jupiter tömegénél nagyobb, akkor rést nyílik a protoplanetáris korongban, így a gáz fékező hatása elhanyagolható. Ha az óriásbolygó tömege ennél kisebb, akkor a protoplanetáris korongban csak részleges rés nyílik, a gáz sűrűsége, valamint az általa keltett fékezőerő már nem hanyagolható el. Annak érdekében, hogy a gáz fékezőerőt megfelelő módon vegyünk figyelembe, hidrodinamikai szimulációkat is végeztünk, a nyilvános FARGO hidrodinamikai kód segítségével (Masset, 2000).

Megállapítottuk, hogy az általunk vizsgált forgatókönyv szerint lehetséges egy maximum 0.6 Föld-tömegű bolygó kialakulása, mely az óriásbolygónak a csillag felé vándorlása (migrációja) során bekerülhet annak lakhatósági tartományába. A fenti, kutatásunk legfontosabb eredménye mellett a Trójai planetezimál-sokaság dinamikai fejlődését is jobban megismertük. Kimutattuk, hogy amint a sokaságból kialakul egy 0.1 Föld-tömegű égitest, az a többi Trójai planetezimál pályáját erősen instabillá teszi. A továbbiakban már nem az ütközések dominálnak, hanem a planetezimálok elszökése. Ez magyarázza, hogy hiába növeltük a planetezimál-sokaság össztömegét, a keletkezett Föld-típusú bolygó tömege már nem nőtt tovább.

## **Rezonáns exobolygó-rendszerek kialakulása**

A több óriásbolygóból álló exobolygó-rendszerek kb. egyharmadában egymással középmozgás - rezonanciában lévő bolygópár található. Egy középmozgás rezonanciához a fél-nagy tengelyek jól meghatározott aránya tartozik, ezért igen valószínűtlen, hogy a rezonáns rendszerek véletlenszerűen alakultak ki ilyen nagy arányban. Jóval valószínűbb, hogy egy külső disszipatív hatás során a bolygók fél-nagy tengelyei változtak (tipikusan csökkentek), és ezáltal teljesült a középmozgás rezonancia feltétele. További dinamikai feltételek teljesülése esetén létrejöhet a rezonáns befogódás jelensége, és a rezonancia fennmaradhat feltéve, hogy a bolygók fél nagy tengelyei csak lassan változnak. Egy külső disszipatív hatás lehet például a protoplanetáris akkréciós korong által a bolygókra kifejtett fékezőerő. A rezonáns rendszerek léte ezt a feltevést, azaz a planetáris migráció hipotézisét látszik megerősíteni, miszerint az óriásbolygók jelentős része keletkezésük során a protoplanetáris koronggal kölcsönhatva a csillag felé vándorolt. A planetáris migráció segítségével megmagyarázható, hogy az eddig felfedezett, feltételezhetően gáz anyagú óriás exobolygók jelentős része miért jóval a „hőhatáron” belül található, ellentmondva ezzel a leginkább elfogadott bolygókeletkezési hipotéziseknek. A planetáris migrációval meg lehet magyarázni továbbá az ún. „forró Jupiterek” (azaz a csillaghoz nagyon közel keringő gázóriások) létezését is.

Kutatásaim során a rezonáns bolygórendszerek kialakulásának fontos aspektusait vizsgáltuk. Az eredményekből három referált publikáció és egy könyvfejezet született. A továbbiakban ezeket ismertetem röviden.

## **Kevert migrációs mechanizmus a HD 128311 rezonáns exobolygó-rendszer kialakulására**

Sándor, Zs., Kley, W.: *Astron. Astrophys.* **451**, L31-L34, 2006

A fenti tanulmányban a HD 128311 csillag körül lévő 2:1 arányú középmozgás rezonanciában lévő bolygórendszer kialakulását modelleztük. A radiális sebességgörbe alapján számolt pályaelemekkel (Vogt és társai, 2005), mint kezdeti feltételekkel, numerikusan vizsgáltuk a rendszer viselkedését. A 2:1 arányú rezonancia azt sugallja, hogy a rendszer a planetáris migráció eredményeképpen alakult ki. Egy eleghetően lassú planetáris migráció során azonban a középmozgás rezonancia mellett még ki kell alakulnia az apszis korotációnak is (Beaugé és társai, 2006). Ez azt jelenti, hogy a bolygópályák (oszkuláló) ellipszisei ugyanazzal az átlagos szögsebességgel fordulnak körbe. Az apszis korotáció mellett a bolygók excentricitásai is (időben) közel állandó értékre állnak be. A rendszert numerikusan integrálva azt kaptuk, hogy egyrészt a két bolygópálya között nincs apszis korotáció, másrészt az excentricitások is igen széles határok között változnak.

A megfigyelési adatokból számított dinamikai viselkedés megmagyarázásához modelleztük a rendszer kialakulását. Olyan kialakulási forgatókönyvet tételeztünk fel, amelyben a planetáris migrációt egy hirtelen perturbáció követi. Ez lehet (i) az óriásbolygók migrációjának hirtelen leállása, vagy (ii) a belső óriásbolygónak a rendszerben a csillaghoz közelebb lévő kb. 7-10 Föld-tömegű bolygóval való találkozása, ezt bolygó-bolygó szóródásnak neveztük. Az első esetben a migráció hirtelen leállításával nagyon jól lehetett modellezni az excentricitások jelenleg számított viselkedését, jóllehet a bolygópályák apszis korotációja fennmaradt. A második, a bolygó-bolygó szóródás esetében a csillag felé vándorló belső óriásbolygó hatására a néhányszor Föld-tömegű bolygó rezonanciába fogódott be, majd excentri-

citásának növekedése nyomán pályája lapulttá vált, és keresztezte a belső óriásbolygó pályáját. Ennek hatására a néhányszor Föld-tömegű legtöbbször kidobódott a rendszerből, de közben erősen megzavarta az óriásbolygók pályáit, azaz megszüntette az óriásbolygók pályáinak apszis korotációját, és előidézte az excentricitások nagy amplitudójú változását. Az óriásbolygók 2:1 arányú középmozgás rezonanciája megmaradt, és a létrejövő rendszer dinamikai viselkedése igen hasonló lett a megfigyelésekből számított viselkedéshez.

### **A HD 73526 rezonáns bolygórendszer kialakulása a kevert migrációs mechanizmus szerint**

Sándor, Zs., Kley, W., Klagyivik, P.: *Astron. Astrophys.* **472**, 981-992, 2007

A HD 128311 körül keringő rezonáns rendszerhez hasonló dinamikai viselkedést mutat a HD 73526 rezonáns bolygórendszer is. A mozgásegyenletek numerikus integrálásával kimutattuk, hogy a rendszer kaotikus viselkedést mutat a Tinney és társai (2006) által közölt radiális sebességmérésekből számított pályaelemekkel. Ezért új radiális sebességgörbéket illesztettünk az irodalomban közölt mérési pontokra, és négy új pályaelem halmazt adtunk meg, melyekre a rendszer már reguláris, azaz stabil viselkedést mutat. A négy halmazból kiválasztottuk azt, melyre a rendszer legközelebb van egy lassú planetáris migrációból származó végállapothoz, majd ezen pályaadatokra alapozva modelleztük a rendszer kialakulását.

A numerikus szimulációk során kapott eredményeink megerősítették, hogy a rendszer a HD 128311 rendszerhez hasonlóan nyerhette el a megfigyelésekből számított jelenlegi állapotát: a 2:1-es rezonancia létrejött egy planetáris migráció eredménye, melyet egy hirtelen perturbáció zavart meg.

Megmutattuk, hogy a különböző szóródási mechanizmusok fontos szerepet játszhattak a bolygórendszerek korai fejlődése során. A numerikus kísérletek során finomítottunk a kialakulási modellen, és részletesen vizsgáltuk a bolygó-bolygó szóródás mechanizmusát.

Olyan, az irodalomban eddig nyitott kérdést is megvizsgáltunk, hogy miként lehetséges, hogy a befelé vándorló óriásbolygó excentricitása nem növekedik a megfigyelésből számított érték fölé. Bebizonyosodott, hogy ha az akkréciós korong belső, a bolygók és a csillag között található része nem veszti el a gázanyagot, akkor az hatékonyan ellensúlyozhatja az excentricitások növekedését.

A szimulációkat disszipatív erők hatását is magába foglaló gravitációs N-test probléma integrálásával, valamint teljes hidrodinamikai modellben történő numerikus integrálással végeztük.

### **Az eredményeinken alapuló összefoglaló könyvfejezet**

Kley, W., Sándor, Zs.: in *Extrasolar Planets: Formation, Detection and Dynamics* (ed. R. Dvorak), Wiley-WCH Verlag, Weinheim, Germany, 2008 (Physics Textbook sorozat)

A fenti tanulmányban áttekintjük a rezonáns exobolygó-rendszerek kialakulásával kapcsolatos eddigi ismereteket (a szerzőpár cikkeit alapul véve). A fejezet első felében ismertetjük a különböző rezonáns exobolygó-rendszerekkel kapcsolatos hidrodinamikai vizsgálatokat, és a bolygó-akkréciós korong kölcsönhatás különböző aspektusait. A rezonancia második alapmodelljének segítségével feltételt adtunk a 2:1 arányú középmozgás rezonanciába történő befogódásra, majd ismertettük a különböző rezonáns exobolygó-rendszerek kialakulásának modellezése során elért eredményeinket.

### **Hatékony excentricitás csillapítás belső akkréciós korong segítségével; GJ 876 kialakulása**

Crida, A., Sándor, Zs., Kley, W.: *Astron. Astrophys.* közlésre elfogadva, 2008

A rezonáns bolygórendszerek keletkezését teljes hidrodinamikai modellben, valamint disszipatív erőket is figyelembe vevő gravitációs N-test probléma numerikus integrálásával vizsgálják. A numerikus szimulációk során általában azt feltételezik, hogy csak a külső óriásbolygó hat kölcsön a protoplanetáris akkréciós koronggal, a belső bolygó már a korong gázanyagát veszített részében kering. A külső bolygó

befelé történő vándorlása során bizonyos fél-nagytengety aránynál befogja a belső bolygót a megfelelő középmozgás rezonanciába. Ezután a belső bolygó is a csillag felé vándorol, veszít impulzusmomentumból mely hatására excentricitása növekedni kezd. Mivel a két bolygó szoros dinamikai kapcsolatban áll egymással, a külső bolygónak is nőni kezd az excentricitása. A külső bolygó excentricitás növekedését a körülötte lévő protoplanetáris korong csillapítja; minél lapultabb a bolygó pályája, annál inkább behatol a korong sűrű gázanyagába, így excentricitása ismét csökken.

A GJ 876 körül lévő bolygórendszer a rezonáns rendszerek legismertebb képviselője. A rendszer kialakulását már többen is vizsgálták (Lee és Peale, 2002; Kley és társai, 2005), de nem sikerült megoldani a belső bolygó excentricitás-növekedésének problémáját. Ahhoz, hogy a megfigyelések által adott korlátok között maradjon a belső bolygó excentricitása, a numerikus szimulációk során a külső exobolygó excentricitását olyan nagy mértékben kellene csillapítani, amely ellentmond a hidrodinamikai vizsgálatoknak.

Kiindulva a HD 73526 rendszer kialakulásánál nyert tapasztalatainkból, a GJ 876 esetében is feltételeztük, hogy az akkréciós korong belső része nem veszítette el a gázanyagát. A belső korong már igen hatékonyan csillapította a belső bolygó excentricitását, és amint a migrációt fokozatosan leállítottuk, az excentricitások beálltak a megfigyelésekből számított értékekre.

Megvizsgáltuk továbbá azt is, hogy a többi 2:1 középmozgás rezonanciában lévő bolygórendszer kialakulása összeegyeztethető a belső korong feltételezésével. Eredményeink azt mutatják, hogy a GJ 876 mellett a HD 73526 rendszer dinamikai viselkedése könnyebben modellezhető, ha feltételezzük, hogy az akkréciós korong belső része még megvan a csillag körül. A másik két rezonáns rendszer (HD 128311 és HD 82943) kialakulása modellezhető akkor is, ha migrációjuk során eltűnik a csillag és a belső óriásbolygó közötti belső akkréciós korong, ugyanakkor a belső korong fennmaradása esetén is kialakulhat a két rendszer jelenleg is megfigyelhető dinamikai viselkedése.

## Irodalom

- Beaugé, C., Michtchenko, T. A. & Ferraz-Mello, S.: 2006, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **365**, 1160.  
 Kley, W., Lee, M. H., Murray, N. & Peale, S.: 2005, *Astr. & Astrophys.* **437**, 727.  
 Lee, M. H. & Peale, S.: 2002, *Astrophys. J.* **567**, 596.  
 Masset, F.: 2000, *Astron. & Astrophys. Suppl.* **141**, 156.  
 Sándor, Zs., Érdi, B. & Efthymiopoulos, C.: 2000, *Celest. Mech. & Dyn. Astron.* **78**, 113.  
 Sándor, Zs., Széll, A., Érdi, B. & Funk, B.: 2004, *Celest. Mech. & Dyn. Astron.* **90**, 127.  
 Tinney, C. G., Butler, R. P., Marcy, G. W. et al.: 2006, *Astrophys. J.* **647**, 594.  
 Vogt, S. S., Butler, R. P., Marcy, G. W. et al.: 2005, *Astrophys. J.* **632**, 638.